



УДК 621.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ

SIMULATION OF HEAT TRANSFER UNDER CONDITIONS OF FREE MOTION AROUND A HORIZONTAL TUBE

Николаев Дмитрий Владимирович, студент каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: d.nikolaev94@mail.ru, Тел.: +7(912)603-51-31

Неволин Александр Михайлович, ст. преподаватель каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.m.nevolin@urfu.ru. Тел.: +7(343)375-95-97

Dmitriy V. Nikolaev, student, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: d.nikolaev94@mail.ru, Тел.: +7(912)603-51-31

Alexandr M. Nevolin, senior lecturer, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.nevolin@urfu.ru. Тел.: +7(343)375-95-97

Аннотация: В работе рассматриваются вопросы численного моделирования теплоотдачи от поверхности горизонтальной трубы в условиях свободной конвекции в неограниченном объеме. Результаты моделирования представлены в сопоставлении с данными теоретического расчета.

Abstract: The paper deals with the issues of numerical simulation of heat transfer from the surface of the horizontal tube under conditions of free convection in the unbounded space. The simulation results are presented in comparison with the theoretical calculations.

Ключевые слова: теплоотдача; свободная конвекция; моделирование.

Key words: heat transfer; free convection; modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) широко применяются на предприятиях топливно-энергетического комплекса и химической промышленности для охлаждения газообразных и капельных жидкостей. АВО работающие в северных широтах страны значительную часть зимнего периода эксплуатации могут работать на режиме свободной конвекции. Оптимизация геометрии трубного пучка, проведенная с целью интенсификации теплоотдачи в условиях свободной конвекции, позволит расширить диапазон температур наружного воздуха, при которых АВО способен работать с отключенными вентиляторами и тем самым сократить эксплуатационные затраты производства. Оптимизационная задача может быть решена посредством численного моделирования методом конечных элементов.

Представленная работа является составной частью подготовительного этапа решения оптимизационной задачи и имеет целью отработку постановки задачи моделирования, а также

верификацию используемого CFD кода в рамках решения задачи моделирования теплоотдачи при свободной конвекции.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Решение поставленных задач было осуществлено на примере моделирования классической задачи тепломассообмена: теплоотдачи от поверхности одиночной горизонтальной трубы круглого сечения в условиях свободной конвекции в неограниченном объеме. Поверхность трубки в данном случае рассматривалась как неподвижная, изотермичная, имеющая избыточную температуру по отношению к окружающему пространству.

Задача решалась в двумерной стационарной постановке. Для моделирования была подготовлена плоская модель течения вокруг трубки диаметром 25 мм (рис. 1), сама трубка не моделировалась. Симметричность конвективного течения относительно диаметральной плоскости трубки параллельной вектору силы тяжести позволила сократить расчетную области вдвое.

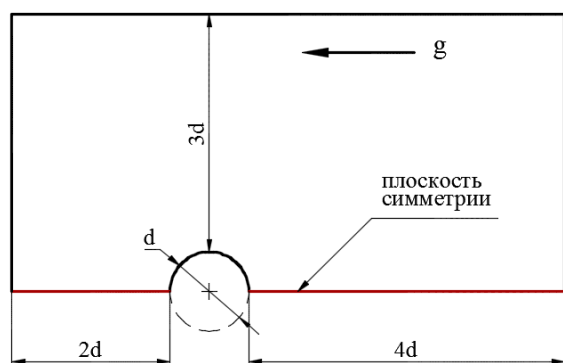


Рис. 1. Расчетная область

Численное моделирование производилось методом конечных элементов посредством программы STAR-CCM+. Неструктурированная сетка модели была сгенерирована на основании полиэдральных ячеек. На поверхности трубки было создано 60 пристеночных призматических слоев (рис. 2) для разрешения теплового пограничного слоя среды, омывающей трубку. Размер ячейки на поверхности трубки задан 0,3 мм, общий объем сетки составил 21000 ячеек.

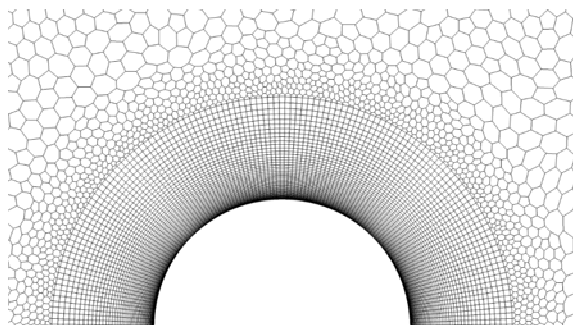


Рис. 2. Полиэдральная сетка модели

В качестве среды использовался сухой воздух. На поверхностях ограничивающих расчетную область задавалось барометрическое давление. Начальные условия: скорость среды равняется нулю, температура среды одинакова для всей расчетной области, на поверхности трубки задавалась постоянная избыточная температура и условия прилипания потока к поверхности.

Был проведен ряд расчетов, отличающихся температурой среды, задаваемой из диапазона $-30...+10$ °C с шагом 10 °C. Данный температурный диапазон выбран на основании реального диапазона температур, при котором возможна работа АВО на режиме свободной конвекции. Температура поверхности трубки во всех расчетах задавалась равной 65 °C. Теплофизические свойства воздуха: плотность, коэффициенты динамической вязкости, теплопроводности, удельной теплоемкости были заданы как полиномиальные функции от

температуры среды. В виду того, что число Рэлея для всего диапазона температур воздуха не превышало $2 \cdot 10^5$, течение рассматривалось как ламинарное. В качестве критерия остановки решения использовался выход коэффициента теплоотдачи от поверхности к среде «на полку».

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве результатов были получены поля распределения температур и скоростей среды (рис. 3) и данные по среднему и локальному коэффициентам теплоотдачи от поверхности трубки.

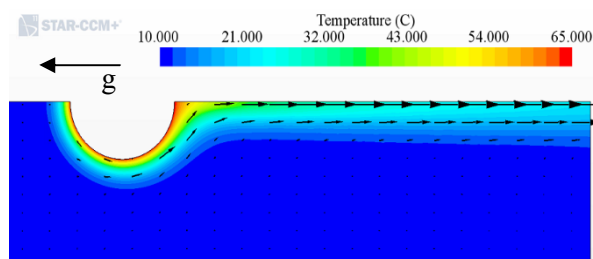


Рис. 3. Скалярное поле температур и векторное поле скоростей конвективного потока

Результаты численного исследования теплоотдачи представлены в безразмерном виде в сопоставлении с данными теоретического расчета:

$$\overline{Nu} = \overline{\alpha} d / \lambda \quad (1)$$

где \overline{Nu} – среднее по поверхности число Нуссельта; $\overline{\alpha}$ – средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); d – диаметр трубки, м; λ – коэффициент теплопроводности среды Вт/(м²К).

Для сопоставления были взяты данные, получаемые по зависимости (2), полученной преобразованием известной формулы (3) [1], при допущении постоянства числа Прандтля воздуха в широком интервале температур ($Pr_g = 0,7$):

$$\overline{Nu} = 0,46 Gr^{0,25}, \quad (2)$$

$$\overline{Nu} = 0,5 Ra^{0,25} \varepsilon^{0,25}, \quad (3)$$

где $Ra = Gr Pr$ – число Рэлея, $\varepsilon = Pr_{жс} / Pr_{см}$ – поправка на изменение свойств жидкости в зависимости от температуры.

Число Грасгофа Gr рассчитывалось по формуле:

$$Gr = \frac{g d^3 \beta (t_{см} - t_{жс})}{\nu^2}, \quad (4)$$

где $g=9,81$ м/с² – ускорение свободного падения;

$t_{ст}$ – температура стенки, °C; $t_{жс}$ – температура среды, °C; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $\beta = 1/(273,15 + t_{жс})$ – коэффициент объёмного расширения, К^{-1} .

Полученные при помощи численного моделирования результаты хорошо соответствуют значениям, вычисленным по формуле (2). Отклонение средних по поверхности коэффициентов теплоотдачи, полученных при моделировании, от теоретических данных в указанном диапазоне температур среды не превышает 4,7% (рис. 4).

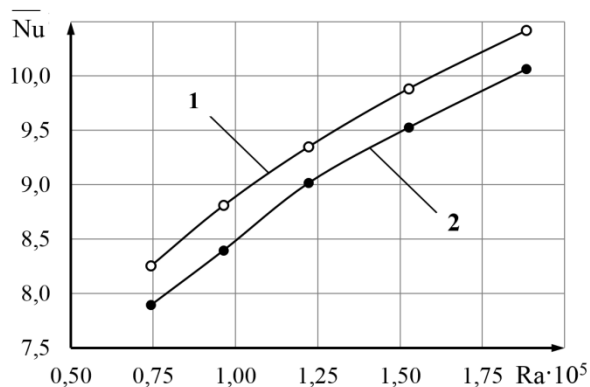


Рис. 4. Сопоставление результатов исследования средней по поверхности теплоотдачи, полученных посредством численного моделирования, с данными теоретического расчета: 1 – данные расчета, 2 – данные моделирования

Локальный коэффициент теплоотдачи принимает наибольшие значения в лобовой точке трубки на угле 0 градусов, плавно снижаясь до 72-73% от первоначального значения на угле в 135 градусов. В диапазоне 135-180 градусов снижение коэффициента теплоотдачи происходит более интенсивно, достигая минимальных значений в размере 20-22% от первоначального в кормовой точке на угле в 180 градусов. Данные по локальной теплоотдаче в виде зависимости безразмерного комплекса $Nu / Gr^{0.25}$ от азимутального угла ξ сопоставлены с результатами исследований Мانتассера, Маллигана [2] и Германна [3], пересчитанными на $Pr = 0,7$ (рис. 5). Наибольшее отклонение данных наблюдается на углах 0...120 градусов, в этом диапазоне результаты, полученные при моделировании, превышают данные [2] и [3] в среднем на 17,4% и 16,8% соответственно.

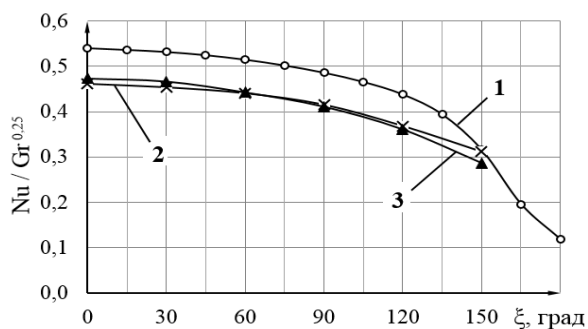


Рис. 5. Сопоставление результатов исследования локальной теплоотдачи, полученных посредством численного моделирования, с данными других авторов: 1 – данные моделирования, 2 – данные Мантассера, Маллигана, 3 – данные Германна

Дополнительно при решении поставленной задачи исследовались сеточные модели, построенные на конечных элементах различных форм. Наряду с полиэдральной сеткой рассматривались тетраэдральная, и гексаэдральная сетки, построенные по одним и тем же параметрам. Модели сравнивались по количеству конечных элементов, времени расчета необходимому для выхода искомой величины (коэффициента теплоотдачи) «на полку» и отклонению от теоретических данных. В результате сопоставления было получено, что полиэдральная сетка содержит на 38% и 3% меньше ячеек, чем тетраэдральная и гексаэдральная соответственно. Время расчета на полиэдральной сетке меньше на 26% по сравнению с тетраэдральной и на 12% по сравнению с гексаэдральной, при этом отклонение результатов от теории на полиэдральной сетке в среднем на 2% больше, чем на тетраэдральной, а результаты, полученные на полиэдральной и гексаэдральной сетках, практически совпадают. В конечном итоге была выбрана полиэдральная сетка ввиду большей скорости расчета при допустимом отклонении результатов от теории (рис. 4).

На основании полученных данных авторы делают вывод о корректности постановки задачи и успешной верификации программы STAR-CCM+ в рамках рассмотренной проблемы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаченко В.П. Теплопередача. Учебник для ВУЗов. Изд. 3-е, перераб. и доп. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – М.: Энергия – 1975. – 488 с.
2. Muntasser M.A. A local nonsimilarity analysis of free convection from a horizontal cylindrical surface / M.A. Muntasser, J.C. Mulligan // Journal of Heat Transfer. –1978. – №100. – pp. 165–167.
3. Гебхарт Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. В 2-х книгах, кн. 1. Пер. с англ. / Б. Гебхарт, Й. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Саммакия – М.: Мир, 1991. – 678 с.